

연구논문

탐진강 및 도암만 지역 퇴적물의 퇴적지구화학적 특성과 환경영향

홍진택 · 나범수* · 김주용 · 고영구* · 윤석태* · 신상은 · 김해경** · 문병찬** · 오강호*

전남대학교 지구환경과학부, 전남대학교 과학교육학부*, 광주교육대학교 과학교육과**

(2007년 8월 22일 접수, 2007년 12월 2일 승인)

Sedimentary Geochemical Characteristics and Environmental Impact of Sediments in Tamjin River and Doam Bay

Jin-Taek Hong · Bum-Soo Na* · Joo-Yong Kim · Yeong-Koo Koh* · Seok-Tai Youn*
· Sang-Eun Shin · Hai-Gyoung Kim** · Byoung-Chan Moon · Kang-Ho Oh*

Dept. of Earth systems and Environmental Science, Chonnam National University

Dept. of Science Education, Chonnam National University*

Dept. of Science Education, Gwangju National University of Education**

(Manuscript received 22 August 2007; accepted 2 December 2007)

Abstract

To examine the sedimentary geochemical characteristics of sediment in the Tamjin River and Doam bay, the analysis was conducted, using the sample obtained in February 2000, on the grain size and the contents of metallic elements and organic carbon. The factors that influence the geochemical behavior of metallic elements in the surface sediment are grain size, organism, surrounding soil and CaCO_3 . To find out the pollution level of metallic elements, the enrichment factor (EF) and the index of geoaccumulation (I_{geo}) were researched. The majority of metallic elements sustain their values in natural state. The elements such as K, Ba, Zr, etc. appear to be rich in some places. The EF and I_{geo} of P, Cu, Zn, and Pb, which belong to toxic heavy metals, are partly related with man-made pollution. P and Cu have a high EF , Pb has a high I_{geo} and Zn is high in both EF and I_{geo} . The low contents of P and Cu are not likely to be related with the pollution of water environment. However, given the development of relative pollution, the research and the management regarding the pollutants are needed. Because Pb, naturally enriched by geological characteristics, has a large influence on water environment along with Zn, the adequate measures against man-made pollution should be worked out.

Key words : Tamjin river, Doam bay, sediment, geochemical characteristics, enrichment factor (EF), index of geoaccumulation (I_{geo})

1. 서론

지구계(earth system)는 대기권, 수권, 암석권, 생물권의 4대 권역으로 나누며, 상호 유기적인 밀접한 관계를 가지고 물질순환을 한다. 이 중 수권과 밀접한 관계를 가지는 암석권은 광물의 집합체로 토양과 하상퇴적물의 모체가 된다. 암석의 풍화산물인 토양은 대기권, 수권, 생물권 등과 상호작용에 의해 형성되며, 하천이나 해양의 퇴적분지에 운반·퇴적되어 지각물질의 순환에 참여한다. 최근 도시화·산업화에 의한 물질 순환 과정에서 특정 유해 물질이 부화되고, 수층 하부 퇴적층에 이르기까지 환경 변화를 초래함으로써 인류의 생활에 큰 영향을 주고 있다. 유해 물질들이 물질순환 과정 중에 유체에 의해 토양에 유입되면 토양의 물리, 화학, 생물학적 작용에 의한 자정 능력을 초과함으로써 심각한 환경오염을 일으키며, 유수에 의해 하천으로 유입되어 하천, 호소 및 해양의 수중 환경을 비롯한 전 지구적인 환경변화를 가져온다(Alloway, 1995; Presley, *et al.*, 1980; Salomons and Förstner, 1984; Munendra *et al.*, 2002).

수권환경은 암석권, 대기권, 생물권이 유기적 관계를 가지는 점이지역으로, 수권환경 변화를 파악하기 위해서는 단기간의 환경특성 변화를 반영하는 수질변화를 파악하여야 한다. 그러나 수질은 단기간에 걸친 많은 변화를 보이며, 시간, 장소, 지형 등에 따른 변화가 크기에 지속적인 환경 변화를 추적하기 위해서는 많은 시간과 연구들이 요구된다(오강호, 2002). 이에 비해, 함유되어 있는 중금속들은 담수 및 해수에 함유된 성분들에 비해 시간적 변화가 적고 상대적 함량이 높아 수권환경을 지속적으로 평가하는 유효한 매개체이다(Thornton, 1983). 특히, 이 성분들은 퇴적물 내에 함유된 중금속의 존재형태와 물리·화학적 변화에 따라서 수중으로 재용출되거나 퇴적물 내에 침전될 가능성이 있기 때문에 수권환경에 대한 영향 정도는 높다(Alloway *et al.*, 1988).

연구지역인 탐진강 및 도암만 유역은 우리나라 남해안 중서부에 위치하며, 탐진강 상류에 총저수량 183백만 m^3 , 유역면적 193 km^2 , 연간 2,302MW

의 발전설비를 갖춘 다목적 댐이 건설되어 있다(장흥댐건설단, 2006). 다목적 댐의 건설, 축조 및 매립을 통한 개발사업은 물 부족 국가로 분류되는 우리나라의 지리적 여건에서 볼 때, 용수 확보를 위한 필요한 사업이기도 하나, 하천에서의 다목적 댐, 하구언 건설 등에 따른 개발의 역작용으로 환경적인 장애가 주변 연안 지역에까지 발생하기도 하였다(권오섭, 1991, 신영규과 윤광성, 2005, 윤석태 등, 2003; 2004; 이상득 등, 2005a; 2005b). 따라서 인위적 구조물인 다목적 댐 건설 전·후의 모니터링을 통한 수계 환경의 지속적 관찰이 필요하며, 인위적 환경변화에 대한 영향을 추적할 필요성이 있다. 1990년 이전 건설된 기존의 다목적 댐들은 사전 환경영향평가의 평가항목 및 환경평가에 대한 자료가 미비하여, 사후 환경평가에 대한 결과와 비교하는데 많은 애로점을 가지고 있으며, 특히 수권 내의 퇴적물에 대한 모니터링 결여된 실정이다.

따라서 본 연구는 탐진댐이 완공되기 이전의 탐진강 수계 및 탐진강이 유입되는 도암만을 대상으로 퇴적물에 수반된 수계환경의 특성을 살펴보기 위해 퇴적물을 대상으로 지구화학적 특성 및 원소들의 거동을 규명하고자 한다. 이러한 연구는 탐진댐 가동 후의 탐진강 및 도암만의 수권환경 변화를 평가할 수 있으며, 수권환경 변화의 장기적 모니터링을 통해 환경변화 예측 및 평가의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구지역 개요

탐진강 유역은 행정구역상, 장흥군과 강진군을 관류하며, 경위도는 동경 126°39' ~ 127°02' 북위 34°25' ~ 34°52' 에 위치하고 있다(Figure 1-A). 유역의 지형은 만장년기 지형으로 유역 내의 독립 산괴를 중심으로 대체로 방사상 소지맥이 전개되고 있다. 유역 하계망의 경계부는 동쪽으로 섬진강 유역, 서쪽으로 영산강 유역과 접하며, 이들 지형적 특성을 반영한 점이지대적 성격인 영산강 유역의 넓은 평야와 섬진강 유역의 산지 특성을 함께 보인다. 하천은 수지상 하계망을 형성하며, 배수량은 홍수시 0.8×10⁸톤, 평상시 0.3×10⁸톤, 연간 총배수량 1.6×10⁸

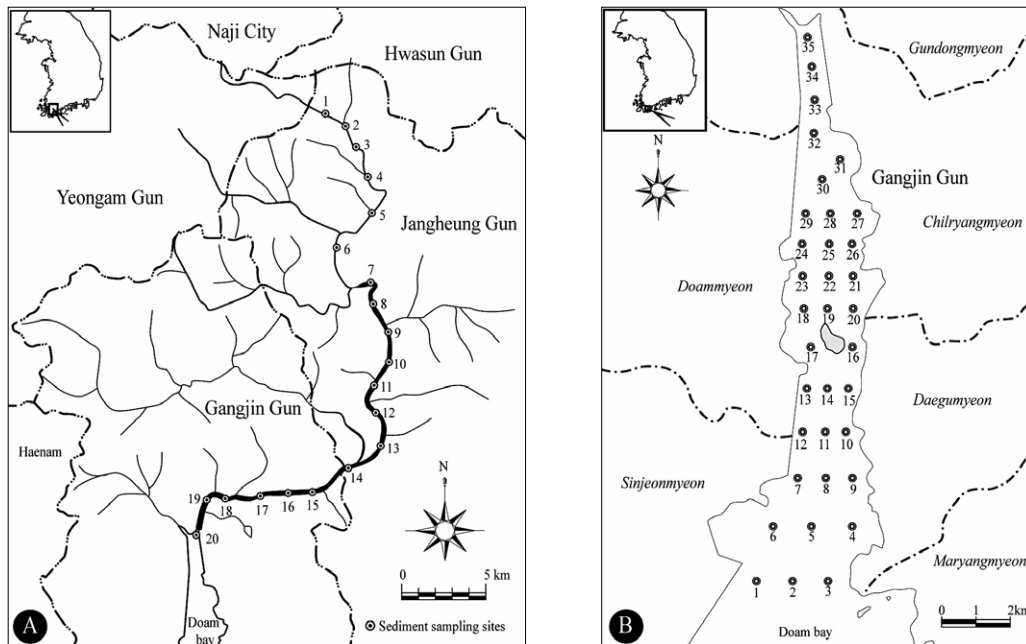


Figure 1. Map showing sampling sites in the study area (A : Timjin river, B : Doam bay)

톤, 유역면적 488.4km², 유역연장 41.0km이며(수자원공사, 1993), 수자원 확보를 위해 상류에 탐진 다목적 댐이 건설되어 있다. 또한, 하상단면의 경사는 유로의 연장이 짧아 급한 경사를 보이거나, 높은 산계 사이를 관류하는 관계로 지형에 지배당하는 감입곡류(entrenched meander)형이 잘 나타난다.

탐진강이 유입되는 도암만은 전형적인 남해안의 특성으로 굴곡이 심하고, 염하구와 도서들이 있어 다양한 리아스(rias)식 연안환경이 전개된다(Figure 1-B). 도암만은 남쪽으로 완도 인근까지 협소하면서도 길게 대상으로 전개되어, 총 연장 35km, 만의 중심부 폭 12km 내외, 만의 총면적 90km²이다. 만 내에는 가우도를 비롯한 8개의 도서가 산재하며, 탐진강을 비롯하여 장계천, 강진천, 도암천 등이 유입된 관계로 주위 해역에 비해 염도가 낮아 염분량은 32.3‰, 평균수온이 6.1°C이며, 수심은 10m 내외이다.

만 내의 해저지형은 좁게 발달한 주 조류로(main channel)를 제외하고 수심은 4.5m 미만으로 대체로 단조롭고 평탄하다. 지형 단면은 가우도에서 하후도까지 남북 방향으로 완만한 5 ~ 10° 내외의 경사와 동서 방향으로는 5° 내외의 완만한 경사를 보

여준다. 그러나 하후도 남쪽에서는 20m 내외로 수심이 깊어진다. 가우도에서 남쪽 마을 부근에 이르는 해역에서는 수심이 20m 이상으로 깊어져 주 조류로를 이루며, 특히 조류로 동측에서 급경사를 나타내는데 반해, 서측에는 소규모 마운드(mound)가 나타난다(유환수 등, 1990). 조석은 1일 2회 조의 반일주조이며, 대조차 3.7m, 소조차 2.7m로 중조차 환경에 해당한다. 조석주기는 왕복성 반일주조가 우세하여, 창조 시에는 마량과 완도 방면에서 1.3m/sec의 유속으로, 낙조 시에는 0.65m/sec의 유속으로 완도와 마량 쪽으로 흐른다.

III. 시료채취 및 분석방법

연구지역의 퇴적환경과 지구화학적 특성을 파악하기 위한 퇴적물의 채취는 강수 및 폭풍 등에 의한 환경 변화의 영향이 적은 시기인 2000년 2월에 시행하였다. 퇴적물 시료들은 1:25,000의 지형도와 해도를 이용하여 탐진강 20개, 도암만 35개 정점을 선택하였으며, 라폰(La Fond)형 채니기를 사용하여 채취하였다. 또한, 표층퇴적물 시료 채취시 증급속 원

소의 분석결과에 영향을 미칠 수 있는 채취기에 의한 오염소지를 줄이기 위하여 중심부의 부분만을 따로 채취하여 지화학 분석을 위한 시료로 사용하였다.

퇴적물 입도분석은 시료를 20~30g 정도 취하여 과산화수소(H₂O₂)와 묽은 염산(HCl)으로 유기물과 탄산염을 제거한 후, Ingram(1971)과 Galehouse (1971)의 방법에 따라 건조기에서 충분히 건조시켜 사질과 니질 부분으로 분리하였다. 사질 퇴적물의 입도는 표준체를 이용한 건식체질(dry sieving) 방법을, 니질 퇴적물은 침전속도를 이용한 피펫법(pipetting method)으로 퇴적물의 입도별 함량을 구하였다.

지구화학적 분석을 위한 하상퇴적물 시료는 70℃ 이하로 건조기에서 충분히 건조시킨 후, 아게이트 모르타르(agate mortar)를 사용하여 200mesh 이하의 크기로 분말화 한 후, 유도결합플라즈마방출분광기(ICP-AES, Optima 4300DV, Perkin-Elmer)를 이용하여 측정하였다. ICP를 분석을 위한 시료 전처리하는 시료 약 0.1g을 취하여 HNO₃:HF:HClO₄의 혼합비를 2:1:1로 한 혼합산을 첨가하여 반응시킨 후, HNO₃+HClO₄(1:1)로 추가 반응하여 완전 용액화시킨 후 20g으로 평량하여 측정하였다. 원소의 분석 시에는 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 중복분석과 아울러 미국표준기술연구소(NIST)의 표준시료(RM 8704; buffalo river sediment)를 병행분석 하였으며, 그 결과 측정값의 정밀도는 ±5%(반복측정의 상대표준편차), 정확도는 ±10%(표준시료 RM 8704에 대한 상대오차) 이내로 나타났다.

유기탄소는 약 0.1g의 분말시료에 일정량의 중크롬산칼륨(K₂Cr₂O₇)과 황산을 혼합한 산화제 용액

을 과량으로 넣어 시료 중의 유기탄소를 산화시키고 남은 양을 황산암모늄제 II철(Fe(NH₄)₂(SO₄)₂)로 정량하는 역적정(back titration)으로 분석하였다(Strickland & Parsons, 1972). 이 때 매 회 실험마다 분석치의 신뢰도 검증을 위해 분석시, 동일 시료의 중복분석을 통하여 표준편차 ±10% 이내의 값만을 취하였다. 또한 공시료에 대한 중복분석을 실시하여, 표준변환율(Standard Conversion Factor)에 따른 유기탄소 함량을 보정하였다.

IV. 결과

1. 퇴적물 분포 특성

탐진강 수계 하상퇴적물의 입도분포는 Table 1과 같다. 평균입도(Mz)는 -1.34~7.78φ 범위로 왕모래(granule)에서 세립 실트(fine silt) 크기에 해당하며, 분급도(sorting)는 0.65~4.18φ 범위로 보통 분급(moderately well sorted)에서 극단적 불량 분급(extremely poorly sorted)에 이르기까지 편차가 심한 값을 보인다. 왜도(skewness)는 -0.34~0.88로 very coarse skewed에서 very fine skewed에 이르기까지 광범위한 범위로 분포한다. 도암만 표층 퇴적물의 평균입도는 1.75~7.52φ 범위로 중립사(medium sand)에서 세립 실트에 해당하며, 분급도는 0.83~4.43φ 범위로 보통 분급에서 극단적 불량 분급에 이르며, 왜도는 -0.29~0.71로 coarse-skewed에서 fine-skewed에 해당한다.

탐진강 표층퇴적물은 도암만 해양 퇴적물과 다른 분포 특성을 보인다. 일반적으로 해양 퇴적물은 해

Table 1. Textural parameters of the surface sediments in the study area

	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean (Mz; φ)	Sorting (σ; φ)	Skewness (S _{KI})	Kurtosis (K _C)
Tamjin river sediments (n=20)								
Min.	0.00	1.11	0.00	0.00	-1.34	0.65	-0.34	0.68
Max.	64.10	97.54	64.24	37.15	7.78	4.18	0.88	1.59
Aver.	16.69	59.60	13.51	10.20	1.96	1.88	0.11	0.99
SD	18.17	30.45	21.90	14.72	3.12	1.27	0.29	0.23
Doam bay sediments (n=35)								
Min.	0.00	1.26	2.70	2.60	1.75	0.83	-0.29	0.67
Max.	26.21	94.64	80.01	34.68	7.52	4.43	0.71	2.56
Aver.	1.37	26.53	51.31	20.79	5.59	2.64	0.21	1.02
SD	4.57	24.47	19.84	7.77	1.50	0.70	0.23	0.42

수운동의 다양성, 조류 및 파랑 등의 영향에 따른 퇴적물의 재동과 재배치에 의해 비교적 넓은 공간 내에 일정한 유형의 퇴적물로 구성된다(Alexander *et al.*, 1991; 신상은 외, 2002). 반면, 하천에서는 하상경사를 비롯한 지형상의 특성, 이에 따른 유속 및 유량의 변화, 주변 지질을 구성하는 암석의 성분 및 기후 등이 퇴적물의 공급과 분포의 공간적 변화의 요인으로 작용한다(Miall, 1977; 유환수 외, 2000; 김주용 외, 2001; 오강호, 2002). 탐진강 유역의 하상경사는 상부지역의 경우, 높은 산세와 갑입곡류의 지형적 특징에 의해 비교적 경사가 크며 지형에 따른 유로의 방향 변화가 심하다. 또한, 하부지역에서는 수질 정화 및 유량확보를 위한 보(dammed pool) 등의 인공 구조물들이 설치되어 있다. 이와 같은 상부지역의 급한 하상경사와 유로의 방향변화는 유속에 큰 변화를 주고 있으며, 하부지역에서의 인공구조물들은 유수의 일시적인 정체를 가져올 수 있다. 따라서 탐진강 하상퇴적물의 입도분포가 광범위한 것은 유속의 변화와 인공 구조물들에 의한 간섭현상 등이 작용한 결과로 생각된다. 특히, 연구지역에서 퇴적물의 전반적인 변화가

상부에서 하부로 갈수록 조립질에서 세립질 환경으로 천이해 가는 것은 유속에 따른 퇴적물의 이동기작과 관련성이 크다.

한편, 도암만 퇴적물의 입도는 만 북쪽에서 남쪽보다 다소 조립화되는 경향을 보이며, 만 중앙의 가우도 부근에서는 일부 역을 함유한 사질 퇴적물이 분포하는 조립화 현상이 나타난다. 그리고 만이 협소하기는 하나 우측 연안이 좌측 연안보다는 퇴적물이 상대적으로 조립질 경향을 가진다. 즉 하천수의 영향을 받는 부분에서는 조립질 퇴적물, 해수의 영향권이 지배적인 곳에서는 저에너지 환경의 조성으로 세립질이 퇴적되는 경향을 반영하고 있다. 이는 도암만 퇴적물 분포에 영향을 주는 요인으로 가우도와 가우도 부근의 주 조류로 중심요한 해저지형 상의 특성과, 만 내로 유입하는 조류와 유출되는 조류의 에너지의 차이에 기인한 해수운동의 다양성, 조류 및 파랑 등의 영향으로 판단된다.

2. 금속원소 함량 및 상관성

연구지역 하상퇴적물의 금속원소 함량분포는 Table 2와 같다. 탐진강 수계에서 정점에 따른 주

Table 2. Metal element, calcium carbonates, organic carbon contents and mean grain size of surface sediments in the study area (unit : %, *mg/kg)

Tamjin river sediments (n=20)												
	¹ Al ₂ O ₃	¹ Fe ₂ O ₃	¹ MgO	¹ CaO	¹ Na ₂ O	¹ K ₂ O	¹ TiO ₂	¹ P ₂ O ₅	¹ MnO	² Ba	² Co	² Cr
Min.	7.24	1.00	0.23	0.32	0.54	2.00	0.14	0.04	0.02	464	1	5
Max.	16.48	6.04	2.17	1.07	1.76	3.58	0.67	0.18	0.25	730	13	85
Aver.	11.16	3.47	0.89	0.63	0.99	2.71	0.38	0.09	0.08	576	6	35
SD	2.85	1.32	0.52	0.21	0.34	0.37	0.15	0.05	0.06	70	3	21
	² Li	² Ni	² Sc	² Sr	² V	² Y	² Zr	² Cu	² Zn	² Pb	¹ CaCO ₃	¹ C- _{Org}
Min.	16	4	3	86	11	7	94	3	19	23	-	0.05
Max.	83	33	14	133	92	24	227	23	104	41	-	2.38
Aver.	36	14	8	110	44	15	145	11	58	32	-	0.64
SD	19	8	3	16	21	5	31	6	27	6	-	0.72
Doam bay sediments (n=35)												
	¹ Al ₂ O ₃	¹ Fe ₂ O ₃	¹ MgO	¹ CaO	¹ Na ₂ O	¹ K ₂ O	¹ TiO ₂	¹ P ₂ O ₅	¹ MnO	² Ba	² Co	² Cr
Min.	8.27	1.75	0.50	0.62	1.32	2.77	0.25	0.05	0.04	383	3	18
Max.	17.65	6.54	2.51	4.06	6.93	4.04	0.84	0.14	0.20	1,307	14	89
Aver.	13.15	4.49	1.71	1.27	2.23	3.03	0.53	0.09	0.08	522	10	64
SD	1.98	1.02	0.46	0.61	0.94	0.22	0.12	0.02	0.04	142	2	17
	² Li	² Ni	² Sc	² Sr	² V	² Y	² Zr	² Cu	² Zn	² Pb	¹ CaCO ₃	¹ C- _{Org}
Min.	27	6	4	104	21	9	59	4	27	20	0.15	0.07
Max.	89	35	15	229	93	25	118	31	103	37	9.09	1.11
Aver.	63	24	10	141	67	18	75	17	73	27	1.60	0.66
SD	14	7	2	22	17	3	13	6	17	4	1.66	0.22

성분 원소 시료간 함량 표준편차(SD)는 K₂O 13.80%(σ_X/\bar{X}), Al₂O₃ 25.51%, CaO 33.21%, Na₂O 34.36%, Fe₂O₃ 38.06%, TiO₂ 39.51%, P₂O₅ 55.62%, MgO 58.78%, MnO 83.49% 순으로, 미량원소들은 Ba 12.11%, Sr 14.62%, Pb 19.64%, Zr 21.62%, Y 34.56%, Sc 38.08%, Zn 46.17%, V 47.86%, Cu 48.29%, Co 54.04%, Li 54.32%, Cr 61.47%이었으며, 유기탄소는 113.87%이었다. 금속원소들 간의 관련성을 살펴보기 위한 상관관계는(Table 3), Al과 관련하여 Fe

(r=0.93), Mg(0.86), P(0.75), Mn(0.83) 등이 유의계수 P<0.01에서 높은 상관성을 보였으며, 이들 원소들은 평균입도(Mz)와도 높은 상관관계(0.90)를 나타냈다. 또한, Ca는 Sr과 0.68(P<0.01), K는 Ba과 0.68, P는 Cu(0.75), Zn(0.82), Pb(0.71), C-org(0.93), Mz(0.90) 등 유해중금속류, 유기물, 입도와 높은 상관성을 보였다.

한편, 도암만 해역에서는 주성분 원소 시료간 함량 표준편차(SD)는 K₂O 7.20%(σ_X/\bar{X}), Al₂O₃ 15.05%, TiO₂ 21.79%, Fe₂O₃ 22.72%, P₂O₅

Table 3. Correlation coefficients for metals and mean grain sizes of surface sediments in the study area

	Al	Fe	Mg	Ca	K	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Sr	Zn	Zr	Pb	C-org	Mz
Al	1.00																	
Fe	0.93	1.00																
Mg	0.86	0.93	1.00															
Ca	0.36	0.49	0.40	1.00														
K	0.53	0.27	0.30	-0.22	1.00													
P	0.75	0.64	0.57	0.28	0.17	1.00												
Mn	0.83	0.86	0.90	0.31	0.38	0.59	1.00											
Ba	-0.02	-0.30	-0.38	-0.43	0.68	-0.15	-0.31	1.00										
Co	0.94	0.98	0.94	0.42	0.34	0.68	0.87	-0.24	1.00									
Cr	0.83	0.90	0.96	0.34	0.25	0.59	0.82	-0.37	0.94	1.00								
Cu	0.90	0.92	0.88	0.46	0.24	0.75	0.79	-0.28	0.93	0.89	1.00							
Ni	0.88	0.91	0.98	0.35	0.30	0.69	0.88	-0.35	0.95	0.97	0.91	1.00						
Sr	0.63	0.53	0.55	0.68	0.29	0.59	0.55	-0.09	0.57	0.51	0.60	0.56	1.00					
Zn	0.97	0.94	0.84	0.42	0.36	0.82	0.80	-0.14	0.94	0.82	0.93	0.88	0.59	1.00				
Zr	-0.76	-0.71	-0.68	-0.38	-0.43	-0.66	-0.70	0.05	-0.77	-0.73	-0.77	-0.74	-0.62	-0.76	1.00			
Pb	0.94	0.90	0.75	0.35	0.43	0.71	0.68	0.03	0.90	0.76	0.86	0.79	0.50	0.94	-0.73	1.00		
C-org	0.66	0.51	0.39	0.33	0.12	0.93	0.36	-0.04	0.54	0.42	0.69	0.52	0.57	0.74	-0.57	0.68	1.00	
Mz	0.90	0.77	0.77	0.30	0.39	0.90	0.75	-0.10	0.83	0.76	0.89	0.85	0.68	0.91	-0.72	0.81	0.84	1.00

	Al	Fe	Mg	Ca	K	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Sr	Zn	Zr	Pb	CaCO ₃	C-org	Mz
Al	1.00																	
Fe	0.96	1.00																
Mg	0.89	0.91	1.00															
Ca	0.10	0.15	0.19	1.00														
K	0.30	0.30	0.15	0.62	1.00													
P	0.82	0.89	0.72	0.10	0.31	1.00												
Mn	0.59	0.63	0.45	-0.15	0.15	0.85	1.00											
Ba	-0.22	-0.21	-0.36	0.68	0.77	-0.09	-0.08	1.00										
Co	0.93	0.96	0.94	0.13	0.13	0.80	0.54	-0.34	1.00									
Cr	0.90	0.93	0.94	0.12	0.12	0.76	0.48	-0.38	0.98	1.00								
Cu	0.71	0.69	0.74	0.02	0.02	0.50	0.38	-0.34	0.69	0.65	1.00							
Sr	0.11	0.13	0.18	0.94	0.50	0.08	-0.16	0.60	0.12	0.09	0.03	1.00						
Zn	0.97	0.98	0.91	0.10	0.24	0.86	0.67	-0.23	0.95	0.90	0.71	0.09	1.00					
Zr	-0.42	-0.40	-0.54	-0.22	0.25	-0.21	-0.03	0.29	-0.56	-0.52	-0.43	-0.35	-0.43	1.00				
Pb	0.71	0.73	0.55	-0.05	0.38	0.82	0.86	0.01	0.63	0.55	0.38	-0.08	0.76	-0.01	1.00			
CaCO ₃	0.08	0.09	0.08	0.91	0.65	0.04	-0.14	0.72	0.05	0.04	-0.06	0.88	0.05	-0.12	-0.05	1.00		
C-org	0.83	0.87	0.94	0.15	0.14	0.75	0.58	-0.28	0.88	0.84	0.76	0.15	0.90	-0.48	0.60	0.07	1.00	
Mz	0.72	0.69	0.82	0.02	-0.19	0.46	0.20	-0.56	0.81	0.83	0.61	0.09	0.70	-0.68	0.29	-0.06	0.69	1.00

(correlation is significant at the 0.01 level; 2-tailed)

23.11%, MgO 26.87%, Na₂O 42.15%, MnO 44.55%, CaO 48.27% 순으로, 미량원소들은 Pb 14.80%, Sr 15.50%, Y 16.52%, Zr 17.08%, Li 22.54%, Zn 23.38%, Sc 23.41%, Co 23.42%, V 25.91%, Cr 26.56%, Ba 27.14%, Ni 27.82%, Cu 33.46%이었으며, 유기탄소와 탄산염은 각각 33.86%, 103.73%로 나타났다. 금속원소들 간의 상관성은 Al이 유의계수 P<0.01에서 Fe(r=0.96), Mg(0.89), P(0.82), Co(0.93), Cr(0.90), Zn(0.97), 유기탄소(0.83), 평균입도(0.72)와 높은 상관관계를 보였다. 유기탄소는 Al(0.83), Fe(0.87), Mg(0.94), P(0.75), Co(0.88), Cr(0.84), Cu(0.76), Li(0.89), Ni(0.88), Zn(0.90)과 높은 상관성을, 산화물로 해양퇴적물에 비교적 높은 함량을 보이는 탄산염(CaCO₃)는 Ca(0.91), K(0.65), Ba(0.72), Sr(0.88)과 좋은 관계를 보였다.

3. 금속원소 조절요인

퇴적물을 대상으로 입도와 유기물을 비롯한 금속원소의 거동에 영향을 주는 요인들을 종합적으로 살펴보기 위하여 주성분분석법(PCA : Principal components analysis)을 이용한 요인분석(factor analysis)을 시행하였다. 일반적으로 퇴적물 내의 금속원소 함량 변화는 퇴적물의 지각근원물질, 입도, 유기물, 산화물 등의 영향에 민감한 것으로 알려져 있다(Förstner and Wittmann., 1981; Salomons and Förstner, 1984; Adriano, 1986). 탐진강 퇴적물을 대상으로 요인분석을 실시한 결과, 총 3개의 요인이 자료의 총분산에 대하여 82.23%의 적재량을 보였다(Table 4). 요인 1은 전체분산에 대한 기여율이 51.75%로 Al, Fe, Mg, Ti, Mn, Co, Cr, Li, Ni, Sc, V 등이 높은 적재량을 보였다. 이들 변수들은 쇄설성 점토광물 기원과 관련되는 원소들로(이종현 등, 1998), 주변 암석에서 풍화된 점토광물의 영향을 반영한다. 요인 2는 기여율 26.38%로 유기탄소를 비롯한 P, Cu, Zn, Pb, Sr 등에서 높은 적재량을 보였다. 이들 변수들은 유기물과 친화력이 비교적 높은 원소들로(Aston, 1974;

Table 4. Factor analysis of variables and factor scores for surface sediments in the study area

Tamjin river sediments				Doam bay sediments			
Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Al	0.78	0.56	0.21	Al	0.96	0.05	0.01
Fe	0.89	0.39	-0.09	Fe	0.98	0.07	-0.03
Mg	0.96	0.24	-0.06	Mg	0.90	0.04	0.20
Ca	0.27	0.44	-0.53	Ca	0.08	0.96	0.14
Na	0.50	0.29	0.37	Na	0.12	0.08	0.16
K	0.35	0.11	0.90	K	0.25	0.75	-0.46
Ti	0.83	0.50	0.01	Ti	0.89	0.01	0.15
P	0.38	0.85	-0.01	P	0.86	0.02	-0.31
Mn	0.89	0.24	0.04	Mn	0.64	-0.16	-0.57
Ba	-0.35	0.07	0.87	Ba	-0.27	0.83	-0.39
Co	0.89	0.42	0.00	Co	0.97	0.01	0.19
Cr	0.92	0.26	-0.07	Cr	0.95	-0.01	0.25
Cu	0.77	0.56	-0.07	Cu	0.67	-0.10	0.09
Li	0.91	0.35	-0.02	Li	0.96	0.05	0.04
Ni	0.91	0.36	-0.04	Ni	0.96	0.00	0.18
Sc	0.89	0.43	-0.08	Sc	0.98	0.05	0.09
Sr	0.39	0.64	0.02	Sr	0.05	0.91	0.24
V	0.91	0.37	-0.13	V	0.97	0.01	0.15
Y	0.67	0.68	-0.02	Y	0.89	0.14	-0.07
Zn	0.74	0.63	0.05	Zn	0.97	0.02	-0.04
Zr	-0.62	-0.53	-0.17	Zr	-0.39	-0.08	-0.70
Pb	0.68	0.59	0.16	Pb	0.03	0.95	0.08
C-org	0.17	0.95	-0.01	C-org	0.84	0.03	0.03
Mz	0.62	0.72	0.14	Mz	0.72	-0.14	0.58
Eigenvalue	12.42	6.33	2.17	Eigenvalue	14.52	4.01	2.16
% of variation	51.75	26.38	9.03	% of variation	60.50	16.71	9.00
Cummulative	51.75	78.14	87.17	Cummulative	60.50	77.21	86.21

Wittmann, 1983), 수중환경에서 유기물 증가가 이들 원소들의 함량변화에 작용한 것으로 판단된다. 요인 3은 기여율 9.03%로 K와 Ba 등이 높은 적재량을 보이는데, K와 Ba는 사질 퇴적물에 많이 분포하는 장식 및 운모의 함량에 영향을 받는 원소들로(Bowen, 1979), 하상퇴적물의 근원지인 주변 육상 지질과 관련성이 있다.

도암만 표층퇴적물의 경우에는 총 3개의 요인이 자료 총분산에 대하여 적재량의 86.21%를 설명할 수 있었으나, 실질적으로 의미가 있다고 판단되는 요인 1과 2만을 고려하였다. 요인 1은 Al, Fe, Mg, Co, Cr 등의 금속원소들의 0.8 이상의 적재량과, 전체자료 분산에 대한 기여율이 60.5%로 가장 큰 영향력을 가지는 것으로 나타났다. 이들 변수들은 쇄설성 기원 물질인 주변 암석에서 풍화된 점토광물의 영향을 반영한다. 요인 2는 Ca, K, Sr, Ba,

Pb 등이 높은 적재량을 보이며, 전체 자료 분산에 대한 기여율이 16.71%로, 주변 해역에서 양식하는 패류 등의 영향과 탄산염 광물 영향이 함께 반영된 것으로 해석된다.

4. 금속원소 환경 평가

퇴적물 내의 오염물질에 대한 환경 평가는 미국, 캐나다, 유럽연합의 국가들의 경우, 중금속을 비롯한 퇴적물 내 다양한 물질들의 퇴적물 환경기준 등의 기준치를 설정하고 관리하고 있으나(이창희와 유혜진, 2000), 우리나라는 토양환경보전법에 준할 뿐 별도의 관리 및 기준방안이 설정되어 있지 않다(환경부, 1996). 또한 퇴적물 내 금속원소의 축적 평가 방법에서도 여러 연구자들이 각기 다양한 해석 방법을 제시하고 있는 실정이다. 퇴적물 내 금속원소의 축적에 따른 평가 방법에는 부화지수(enrichment factor; *EF*), 농축지수(index of geoaccumulation; *I_{geo}*), 농축부화비(concentration

enrichment ratios: CER), 오염지수(contamination index; CI) 등이 있다(Bruland *et al.*, 1974; Müller, 1979; Prusty *et al.*, 1994; Sutherland, 2000).

본 연구에서는 금속원소의 축적을 평가하는 방법으로 Bruland *et al.*(1974)에 의한 부화지수와(Table 5), Müller(1979)의 농축지수를 사용하였다(Table 6). 부화지수는 지각평균치의 금속원소 구성비율을 기준으로 퇴적물 내 금속원소의 함량변화를 이용하여 축적 정도를 평가하며, 농축지수는 오염되지 않은 지역의 퇴적물 금속원소 구성비율을 기준으로 다른 퇴적물 내 금속원소 함량과 비교하여 상대적 축적 정도를 평가할 수 있기에 상호 보완적인 평가가 가능하다.

$$EF = \frac{Metal_{(sediment)} / Metal_{(crust)}}{Al_{(sediment)} / Al_{(crust)}}$$

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{Metal_{(sediment)}}{Metal_{(background)} \times 1.5} \right)$$

Table 5. Enrichment factors (*EF*) for metal of surface sediments in the study area

Tamjin river sediments (n=20)																					
	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Co	Cr	Li	Ni	Sc	Sr	V	Y	Zr	Cu	Zn	Pb
Min.	0.24	0.11	0.08	0.20	0.89	0.33	0.24	0.35	1.06	0.07	0.09	1.37	0.09	0.23	0.32	0.14	0.38	0.54	0.09	0.46	2.77
Max.	0.80	0.58	0.36	0.74	1.97	0.85	0.90	1.93	2.94	0.49	0.79	3.87	0.41	0.59	0.60	0.64	0.81	2.92	0.44	1.49	3.98
Aver.	0.65	0.33	0.17	0.37	1.24	0.69	0.49	0.77	1.97	0.33	0.45	2.34	0.24	0.46	0.42	0.44	0.61	1.33	0.28	1.08	3.38
SD	0.13	0.11	0.06	0.11	0.26	0.12	0.19	0.42	0.49	0.11	0.19	0.65	0.09	0.08	0.09	0.11	0.10	0.55	0.08	0.25	0.30
Doam bay sediments (n=35)																					
Min.	1.25	0.27	0.14	0.44	0.93	0.63	0.37	0.50	0.95	0.22	0.33	0.14	2.51	0.15	0.34	0.30	0.29	0.51	0.72	0.41	1.92
Max.	2.58	0.87	0.99	2.19	1.82	1.41	0.67	1.54	3.80	0.55	1.00	0.62	4.33	0.45	0.63	0.76	0.70	0.94	1.39	1.33	3.29
Aver.	1.99	0.57	0.29	0.69	1.16	0.84	0.45	0.74	1.48	0.47	0.73	0.37	3.61	0.37	0.55	0.45	0.57	0.65	1.20	0.55	2.42
SD	0.21	0.10	0.15	0.29	0.19	0.13	0.06	0.26	0.52	0.06	0.13	0.10	0.36	0.06	0.06	0.09	0.08	0.07	0.13	0.18	0.30

Table 6. Indices of geoaccumulation(*I_{geo}*) for metal of surface sediments in the study area

Tamjin river sediments (n=20)																					
	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Co	Cr	Li	Ni	Sc	Sr	V	Y	Zr	Cu	Zn	Pb
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max.	2.01	2.65	1.16	1.12	0.25	1.67	1.58	3.06	0.07	3.12	3.50	1.79	2.46	1.64	0.04	2.48	1.19	0.69	2.35	1.87	0.25
Aver.	1.13	1.19	0.39	0.29	0.02	0.77	0.48	1.03	0.00	1.87	1.96	0.47	1.01	0.68	0.00	1.30	0.48	0.12	1.21	0.90	0.06
SD	0.54	0.72	0.38	0.37	0.06	0.53	0.63	0.89	0.02	0.84	0.92	0.58	0.75	0.47	0.01	0.64	0.41	0.17	0.67	0.63	0.09
Doam bay sediments (n=35)																					
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max.	1.32	1.74	2.13	1.81	0.00	1.16	0.90	1.74	1.19	1.64	1.72	2.37	1.14	1.96	1.32	0.55	1.56	0.89	1.35	0.42	0.30
Aver.	0.75	1.14	0.42	0.20	0.00	0.48	0.33	0.36	0.04	1.14	1.19	1.46	0.60	1.37	0.77	0.03	1.05	0.43	0.82	0.02	0.03

이 때, 부화지수의 보존성원소로는 그 기원이 대부분 지각물질로 알려져 있고, 연구지역에서 상대적으로 함량 변화와 편차가 작은 Al을 사용하였으며, 지각평균값은 Mason and Moore(1982)에 의해 제시된 클라크 농도(clark of concentration)를 사용하였다. 농축지수의 바탕값(background value)으로는 연구지역에서 채취된 하상퇴적물의 상대적인 농축정도를 평가하기 위해 분석값의 최저치 값을 사용하였다.

탐진강 하상퇴적물을 대상으로 한 부화지수는 K 0.89~1.97(평균 1.24), Ba 1.06~2.94(평균 1.97), Zn 0.46~1.49(1.08), Pb 2.77~3.98(3.38)로 부화되는 경향을 보였으며, Ba와 Pb는 전 지점에 걸쳐 부화되었다. 한편, 금속원소의 상대적 농축정도를 파악하기 위한 농축지수는 P가 최대값 1.58(평균 0.48), Cu 2.35(1.21), Zn 1.87(0.90), Pb 0.25(0.05)의 값을 보여 평균적인 농축지수는 Cu가 보통오염(moderately polluted)에 해당하고, P, Zn, Pb는 비오염(practically unpolluted)에 해당하는 것으로 나타났다.

도암만 표층 퇴적물을 대상으로 한 부화지수는 Fe 1.25~2.58(평균 1.99), K 0.93~1.82(1.16) Ba 0.95~3.80(1.48), Ni 2.51~4.33(3.61), Cu 0.72~1.39(1.20), Pb 1.92~3.29(2.42)로 부화되는 경향을 보였다. 농축지수는 Mg, Co, Cr, Li, Sc, Y 등이 평균 1 이상의 값을 나타냈으며, Li(최대 2.37)를 제외한 모든 금속원소의 최대값이 2 미만의 농축지수를 보였다. 이는 연구지역에서 금속원소의 농축이 평균적으로 보통오염 내지 비오염에 해당하는 것을 의미한다. 또한 일부 금속원소가 특정 지역에서 농축지수 1~2의 2등급에 해당하는 보통오염의 등급으로 나타났으나, 유해 중금속류에 해당하는 Cu, Zn, Pb는 비오염 등급으로 퇴적물 오염의 정도가 심각하지 않은 것으로 판단된다.

V. 토 의

퇴적환경에 따른 퇴적물 내 금속원소 함량과 편

차는 하상퇴적물인 탐진강에 비해 도암만 표층퇴적물에서 대부분 금속원소들의 함량이 높으며, 편차는 작은 것으로 나타났다. 이는 퇴적물의 구성물질과 입도에 따른 퇴적환경이 달라짐으로써 금속원소 조절요인에도 다른 영향을 주고 있음을 지시한다. 탐진강 하상퇴적물의 평균입도 분포는 $-1.34 \sim 7.78\phi$ (평균 1.96ϕ)로 편차가 큰 조립질 사질의 특성을 나타내나, 도암만 표층퇴적물은 $1.75 \sim 7.52\phi$ (평균 5.59ϕ)의 편차가 작은 세립질 퇴적물로 구성되어 있다. 이는 세립질로 구성되어 있는 도암만 퇴적물이 탐진강 하상 퇴적물에 비해 입도의 영향을 크게 받는 것으로 볼 수 있다. 또한 이러한 결과는 요인분석의 결과에서도 확인할 수 있다. 도암만 표층퇴적물의 입도에 의한 기여율은 60.50%로 탐진강 하상퇴적물의 입도에 의한 기여율은 51.75% 보다 높아 세립질 퇴적물의 입도 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

한편, 퇴적물 내 금속원소의 거동을 조절하는 요인들도 탐진강 하상퇴적물과 도암만 표층퇴적물에서 차이가 있음이 인지된다. 탐진강 표층퇴적물 내 금속원소는 퇴적물의 입도, 유기물, 주변 지질, 수중환경 등의 영향이 복합적으로 작용하고 있다. 요인분석 결과에 의한 금속원소 거동에 영향을 주는 요인들은 주변 암석에서 풍화된 점토광물의 영향, 수중환경에서 유기물 증가의 영향, 주변 육상 지질과 관련되어 있다. 특히, 유기물질은 인위적 인간 활동에 의해 증가되는 부산물로, 유기물질의 증가는 P, Cu, Zn, Pb 등의 유기물과 친화력이 비교적 높은 원소들의 거동에 영향을 준다. 이들 원소들은 하천 바닥에 장기간 체류할 경우 하천의 기능을 저하시켜 수중생물의 생태와 환경을 파괴하는 유해 요인으로 작용하기에(Aston, 1974; Wittmann, 1983; Horowitz, 1991) 하천 수계 내의 오염물질 거동의 모니터링 대상으로 사용할 수도 있다.

이와 달리 도암만 표층퇴적물에서 금속원소의 거동을 조절하는 요인들은 주변 암석에서 풍화된 점토광물의 영향과 더불어 주변 해역에서 양식하는 폐류 등의 영향과 탄산염 광물 영향이 작용하고 있

음을 시사한다. 이는 입도를 제외한 탐진강과 도암만 퇴적물의 조절하는 요인 영향은 다른 해석을 낳게 한다. 탐진강의 퇴적물 내 유기탄소는 P, Cu, Zn, Pb, 등과 상관성을 보이며, 26.38%의 기여율로 유기물의 영향이 큰 것으로 나타났으나, 도암만에서는 탄산염이 Ca, K, Sr, Ba, Pb 등과 상관성을 보이며, 16.71%의 기여율로 주변 해역에서 양식하는 패류 등의 영향과 탄산염 광물 영향이 함께 반영하는 것으로 나타났다. 탄산염은 육상과 달리 해양 생물인 연체동물의 패각, 어류의 뼈 등에 많이 포함되어 있으며, 일부 탄산염 광물에 존재한다. 육상과 달리 해양 퇴적물은 패각의 영향이 금속원소의 조절요인으로 크게 작용한다. 즉 입도와 관련성이 적은 금속원소인 Ca는 Sr과 더불어 탄산칼슘 성분인 패각 분포의 영향을 받았으며, (Calvert, 1976), Ca를 비롯한 Na, Ti, Ba 등은 조립질 퇴적물에서 함량이 높은 칼륨장석(K-feldspar) 및 운모류의 영향이 작용한 결과라 할 수 있다(조영길 등, 2001; Bowen, 1979). 또한 담수 환경에서 유기물질의 영향을 환경 변화 모니터링 대상으로 할 수 있다면, 탄산염은 해양 환경 변화의 모니터링 대상으로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

연구지역 금속원소들의 부화 및 농축 정도를 파악하기 위한 방법으로 부화지수와 농축지수를 구한 결과, 대다수의 금속원소들이 자연환경 상태의 부화지수 및 농축지수를 나타내었다. 그러나 금속원소의 주 조절요인인 입도 및 유기물에 의한 영향이 작은 K, Ba, Zr, 환경유해원소인 P, Zn, Pb 등은 일부 지역에서 농축되는 것으로 나타났다. K와 Ba는 사질 퇴적물 속에 장석과 운모류의 영향과, 산성암의 조성에 관여하는 원소이다(Bowen, 1979). 이러한 원소들의 부화는 지각평균 함량을 기준으로 볼 때, 주변의 지질 영향에 의한 자연환경적 영향을 반영하는 것으로 볼 수 있다. 이는 상대적 농축 변화를 살펴보기 위한 농축지수에서 확인할 수 있다. K, Ba의 농축지수가 비오염에 해당하는 것은 인위적 영향에 아닌 지질 특성을 비롯한 자연적 부화의 요인으로 볼 수 있다. 또한 Zr의 경우도 절대적 지

각평균 함량을 기준으로 한 부화지수는 높게 나타나나, 이는 다른 금속원소와 달리 풍화에 강한 특성이 기인하고 있다.

그러나 탐진강 하상퇴적물의 경우, 담수에서 부영양화를 일으키는 P와 유해 중금속에 해당하는 Cu, Zn, Pb 등은 부화지수 및 농축지수에 있어 자연적 부화 및 농축보다는 인위적 부화 및 농축을 일부 반영하고 있다. 연구지역에서 P의 부화지수는 1 이하로 지각평균 함량을 기준으로 볼 때, 부화되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 상대적 농축지수는 탐진강 하류지역에서 최고 1.58로 비오염 내지 보통오염에 해당하여 상대적 농축이 진행되고 있다. Cu의 경우도 부화지수는 1 이하이나, 농축지수는 최고 2.35로 보통오염에 해당하여 상대적 농축이 진행된다고 볼 수 있다. 이와 달리 Pb는 부화지수가 전 지점에서 2.77~3.98로 지각평균 함량을 기준으로 볼 때, 매우 높다. 그러나 상대적 오염 평가를 나타내는 농축지수는 최고 0.25로 특정 지점에서의 농축이 진행되지는 않는 것으로 나타났다. Zn은 부화지수와 농축지수에 있어 각각 최고 $EF=1.49$, $I_{geo}=1.87$ 로 모두 높은 값을 보여 절대적 지각평균 함량 및 상대적 농축 정도에 있어 인위적 오염의 영향을 반영하는 것으로 나타났다.

이를 종합하여 볼 때, 탐진강 수계에서 P, Cu의 농축지수, Pb의 부화지수, Zn의 부화지수 및 농축지수가 높게 나타나는 것은 금속원소의 오염평가에 있어 부화지수 및 농축지수는 상호보완적 해석을 가능하게 하고 있다. P, Cu는 지각에 함유된 함량과 비교할 때, 상대적으로 낮은 함량은 수중환경에 대한 직접적 영향이 없을 것으로 판단할 수 있으나, 상대적 농축이 진행되는 것으로 보아 오염원에 대한 조사 및 관리가 필요하다. 또한 Pb는 상대적 농축이 미비하여 지질특성을 비롯한 자연적 부화의 요인으로 볼 수 있으나, 절대적 함량이 높을 경우 수중환경에 미치는 영향이 가중되기에 그 영향을 파악할 필요가 있으며, Zn은 자연 부화와 함께 인간 활동에 의한 농축 영향이 크게 나타나, 이에 따른 적절한 대비책이 강구되어야 할 것이다. 특히

이들 물질의 최종적인 유입은 주변 해역인 도암만으로 유입되기에 비오염 등급으로 퇴적물 오염의 정도가 심각하지 않은 것으로 판단되는 해역에 오염을 가중시킬 가능성이 있어 퇴적환경 변화에 따른 지속적인 모니터링이 이루어져야 할 것으로 판단한다.

VI. 결 론

탐진강 및 도암만을 대상으로 채취한 퇴적물 내 금속원소들 간의 상관관계는 대부분 원소들이 $R^2=0.60$ 이상으로 평균입도와 관련성을 보였다. 입도를 제외한 관련성으로 탐진강에서는 인간 활동에 의해 증가되는 부산물인 유기물질과, 도암만에서는 주변 해역에서 양식하는 패류 및 탄산염 광물 영향이 함께 작용하는 것으로 나타났다. 금속원소들의 부화 및 농축은 대다수의 금속원소들이 지각평균치 바탕값의 부화지수와 농축지수를 보였으나, 탐진강 하상퇴적물에서 K, Ba, Zr 등은 일부 지역에서 부화되는 것으로 나타났다. 특히, 유해 중금속에 해당하는 P, Cu, Zn, Pb 등은 바탕값 보다 높아 인위적인 부화 및 농축이 진행되고 있음을 시사한다. P와 Cu의 낮은 함량은 수중환경에 대한 오염원의 직접적 영향이 없을 것으로 판단할 수 있으나, 상대적 농축이 진행되는 것으로 보아 오염원에 대한 조사 및 관리가 필요하다. Pb는 지질 특성에 의한 자연적 부화에 의한 절대적 함량이 높아 수중환경에 미치는 영향이 크기 때문에, 부화지수와 농축지수가 높은 Zn과 더불어 인위적 농축 영향에 대한 적절한 대비책이 강구되어야 할 것이다. 이는 탐진강의 물질의 최종적으로 도암만으로 유입되기에 퇴적물 오염의 정도가 심각하지 않은 도암만 해역이라 할지라도 오염이 가중될 가능성이 있어 퇴적환경 변화에 따른 지속적인 모니터링이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

권오섭, 1991, 낙동강 하구언 건설에 의한 환경요인

의 변화, 한국육수학회지, 24, 231-238.

김주용, 은고요나, 고영구, 윤석태, 오강호, 김동주, 2001, 전남 나주-영암지역의 영산강 하류 시추퇴적물의 퇴적환경과 지구화학적 특성, 한국지구과학회지, 22, 301-317.

수자원공사, 1993, 전국하천조사서.

신상은, 강석범, 고영구, 박배영, 윤석태, 김주용, 오강호, 2002, 한반도 남서해안 상부조간대의 퇴적상 및 지구화학적 특성, 한국지구과학회지, 23, 722-735.

신영규, 윤광성, 2005, 한강하구역의 수질 및 퇴적물 특성의 공간적 분포, 한국지형학회지, 12, 13-23.

오강호, 2002, 영산강 유역 퇴적환경과 하천수 및 퇴적물의 오염, 전남대학교 박사학위논문.

유환수, 김용도, 고영구, 정진수, 김해경, 1990, 남해 강진만 일대의 퇴적환경에 관한 연구, 한국지구과학회지, 11, 250-260.

유환수, 조석희, 고영구, 2000, 섬진강 유역의 하성 퇴적층에 관한 연구, 한국지구과학회지, 21, 174-187.

윤석태, 고영구, 오강호, 문병찬, 김해경, 2003, 영산강 하류권역 하천수의 수질평가, 환경영향평가, 12, 259-270.

윤석태, 고영구, 오강호, 문병찬, 김해경, 2004, 영산강 하류권역 하상퇴적물의 지화학적 특성과 오염평가, 환경영향평가, 13, 251-262.

이상득, 이길영, 박정규, 2005a, 금강호 퇴적물의 이화학적 특성에 관한 연구, 환경관리학회지, 11, 189-197.

이상득, 이길영, 박정규, 2005b, 금강하구의 수리 및 수질특성에 관한 연구, 환경관리학회지, 11, 199-208.

이종현, 이정석, 김범수, 이창복, 고철환, 1998, 경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성, 바다, 3, 103-111.

이창희, 류혜진, 2000, 수저퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구, 한국환경·정책평가연구원,

- 서울.
- 장흥댐건설단, 2006, <http://jangheung.kwater.or.kr/>
- 조영길, 류상옥, 구영경, 김주용, 2001, 새만금 조간대 표층퇴적물의 성분원소 함량과 지화학적 특성, 바다, 한국해양학회, 6, 27-34.
- 환경부, 1996, 토양환경보전법령, 환경부.
- Adriano, D. C., 1986, Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, Berlin.
- Alexander, C. R., Nittrouer, A. A., De Master, D. J., Park, Y. A., and Park, S. C., 1991, Macrotidal mudflats of southwestern korean coast: a model for interpretation of intertidal deposits, *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 805-824.
- Alloway, B. J., 1995, Heavy metals in soils (2nd ed.), Chapman & Hall, Glasgow.
- Alloway, B. J., Thornton, I., Smart, G. A., Sherlock, J. C., and Quinn, M. J., 1988, Metal availability, *Science of The Total Environment*, 75, 41-69.
- Aston, S. R., Thornton, I., Webb, J. S., Purves, J. B., and Milford, B. L., 1974, Stream sediment composition, an aid to water quality assessment, *Water Air and Soil Pollution*, 3, 321-325.
- Bowen, H. J. M., 1979, Environmental chemistry of the elements, Academic Press, London.
- Bruland, K. W., Bertine, K., Koide, M., and Goldberg, E. D., 1974, History of metal pollution in southern California coastal zone, *Environmental Science and Technology*, 8, 425-432.
- Calvert, S. E., 1976. The mineralogy and geochemistry of near-shore sediments, in Riley, J. P. and Chester, R.(eds) *Chemical Oceanography*, Academic Press, London, 6, 187-280.
- Förstner, U. and Wittmann, G. T. W., 1981, Metal pollution in the aquatic Environment, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Galehouse, J. S., 1971, Sedimentation analysis, in Carver, R. E.(ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Wiley-Interscience, New York, 69-94.
- Horowitz, A. J., 1991, A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry, Lewis Publishers, Chelsea (MI).
- Ingram, R. L., 1971, Sieve analysis, In: *Procedures in Sedimentary Petrology*, Carver, R. E.(ed.), Wiley-Interscience, 49-68.
- Mason, B. and Moore, C. B., 1982, Principles of geochemistry, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Miall, A. D., 1977, A review of the braided river depositional environment, *Earth Science Review*, 13, 1-62.
- Müller, G., 1979, Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Verderungen Seit, *Umschau*, 79, 778-783.
- Munendra, S., Müller, G., and Singh, I. B., 2002, Heavy metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanisation of the Ganga Plain, India, *Water Air and Soil Pollution*, 141, 35-54.
- Presley, B. J., Trefry, J. H., and Shokes, R. F., 1980, Heavy metal inputs to Mississippi delta sediments: A historical view, *Water Air and Soil Pollution*, 13, 481-494.
- Prusty, B. G., Sahu, K. C., and Godgul, G.,

- 1994, Metal contamination due to mining activities at the Zawar zinc mine, Rajasthan, India, 1. Contamination of stream sediments, *Chemical Geology*, 112, 275-291.
- Salomons, W. and Förstner, U., 1984, Metals in the hydrocycle. Springer-Verlag, Berlin.
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R., 1972, A practical handbook of seawater analysis, Fishery Research Board of Canada, Ottawa, 207-211.
- Sutherland, R. A., 2000, Bed sediment associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii, *Environmental Geology*, 39, 611-627.
- Thornton, I., 1983, Applied environmental geochemistry, Academic Press, London.
- Wittmann, G. T. W., 1983, Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin.

최종원고채택 07. 12. 09